MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO

SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA CATARINA

CAMPUS JOINVILLE

CURSO DE TÉCNICO EM MECÂNICA CONCOMITANTE AO ENSINO MÉDIO

UNIDADE CURRICULAR:

Ensaios dos Materiais

Professor: Paulo Sérgio Bayer

Joinville - SC
2013

NOME: ....

Sumário

1) Ensaio de tração

O projeto de um componente mecânico ou equipamento industrial requer conhecimento das propriedades dos materiais disponíveis. Para a seleção de um tipo de material para o projeto são avaliadas as suas propriedades mecânicas e seu comportamento mecânico. Estas características são obtidas através de ensaios mecânicos normalizados. As principais associações de normas técnicas fornecem as normas que descrevem o procedimento do ensaio, bem como requisitos mínimos de resistência mecânica e dureza para diversas classes de aços e ferros-fundidos. Desta forma se estabelece uma linguagem comum entre fornecedores e usuários do setor industrial metal-mecânico. Um dos métodos para se verificar a resistência mecânica de um metal consiste em submeter um corpo de prova ao ensaio de tração. Para entender o princípio deste ensaio, imagine que se aplica determinada carga de tração uma barra de seção transversal constante que seja suficiente para rompê-la. Porém, quando se aplica a mesma carga a uma outra barra com maior área de seção transversal esta não se rompe. De fato existe uma relação de dependência entre a área de seção de uma peça e sua resistência mecânica, frente à uma carga constante F aplicada. Portanto, para se medir a resistência de um material é necessário correlacionar a força aplicada à área de seção da peça. Esta propriedade tem o nome de tensão mecânica (σ) e está ilustrada na Figura 1.1.

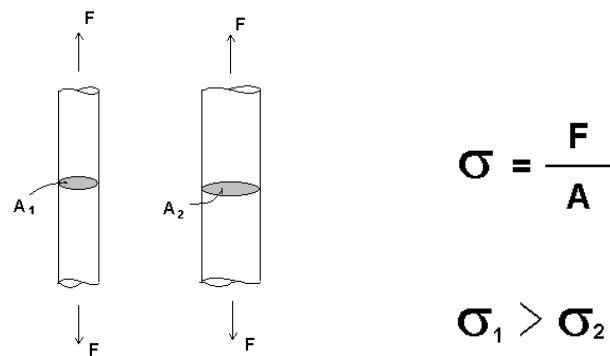



Figura 1.1 Representação da tensão mecânica aplicada sobre barras com diferentes áreas de seção transversal.

Os materiais metálicos apresentam inicialmente um comportamento elástico quando estão sob efeito de cargas de tração crescentes. Na região elástica ocorre alongamento do corpo de prova de tração (cdp) e, sendo retirada a carga, o cdp retoma suas dimensões originais. Se a carga de tração exceder a um determinado limite (limite elástico ou de escoamento), o cdp começa a deformar permanentemente (comportamento plástico), não recuperando mais as suas dimensões originais se a carga for retirada. Em muitos metais este ponto não é bem definido e convencionou-se adotar um percentual de alongamento para a sua determinação. Na Figura 1.2 está ilustrada a curva carga x alongamento (F x a) de um material metálico ensaiado à tração. O alongamento final é dado pela diferença entre o comprimento final e o comprimento inicial ($L_f – L_o$) do corpo de prova.

$$a = L_f - L_o = \text{alongamento} = \Delta l \text{ [mm]}$$

onde:

L_f = comprimento final do cdp;

L_o = comprimento inicial do cdp;

F_{esc} = carga de escoamento [N];

F_{rup} = carga de ruptura [N];

(a) (b) (c)

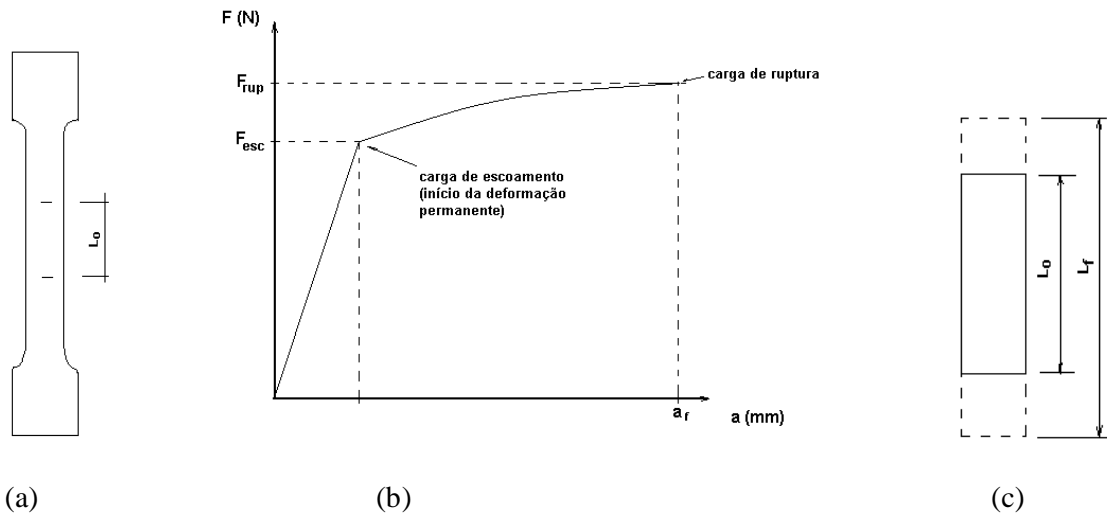



Figura 1.2 Comportamento à tração de um corpo de prova de material metálico; (a) esquema do cdp com o comprimento inicial L_o; (b) curva carga x alongamento do cdp ensaiado; (c) ilustração do alongamento sofrido pelo cdp ($L_f - L_o$).

As propriedades mecânicas à tração de um material são obtidas através da aplicação de cargas crescentes de tração em um corpo de prova padronizado até a sua ruptura, conforme ilustra a Figura 1.3.

(a) (b)

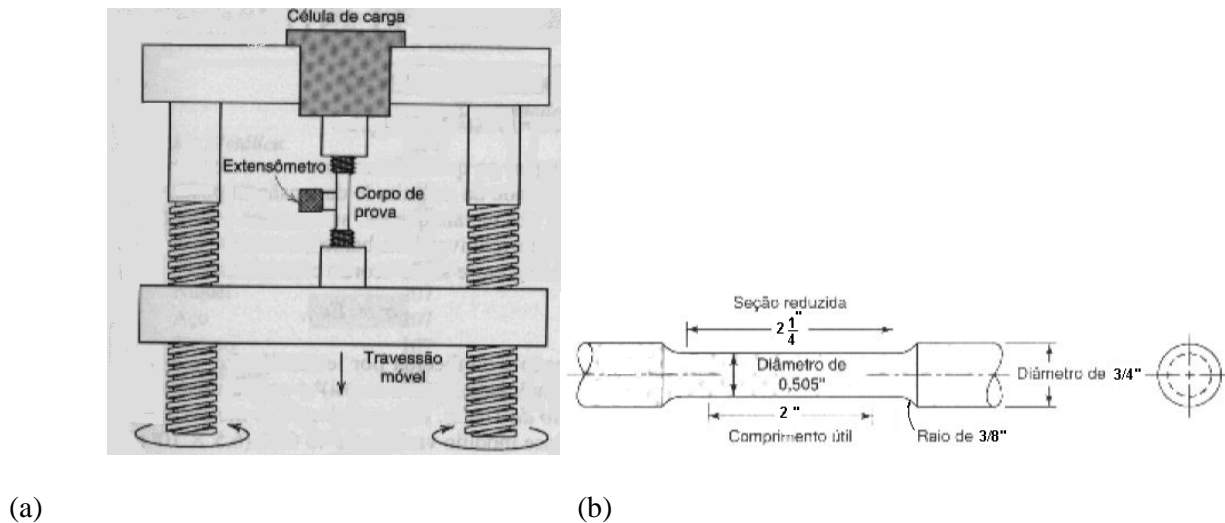



Figura 1.3 Dispositivo de ensaio de tração para determinação da curva tensão x deformação do material metálico. (a) A célula de carga mede a carga aplicada e o extensômetro acoplado ao cdp mede o alongamento; (b) corpo de prova padrão com seção reta circular para ensaios de tração.

O ensaio de tração é muito utilizado como teste para o controle de qualidade de matéria-prima para diferentes processos. Este teste fornece como resultado a curva tensão de tração versus deformação sofrida pelo corpo de prova. Como visto, o conceito de tensão mecânica (σ) considerada no ensaio é fundamental, pois representa a medida da resistência mecânica dada dividida pela área da seção transversal do corpo de prova em sua porção útil. No ensaio convencional (também denominado ensaio de engenharia) a tensão de tração é dada por

$$\sigma = F / A_o$$

onde:
- σ = tensão convencional (ou de engenharia) [N/mm2];
- A_o = área da seção transversal do corpo de prova [mm^2];
- F = carga aplicada [N].

A deformação convencional ε é definida pela razão entre o alongamento em dado instante e o comprimento inicial do cdp:

$$\varepsilon = (L_f - L_o) / L_o = \Delta l / L_o \quad \text{[mm/mm] ou \% (x100)}$$

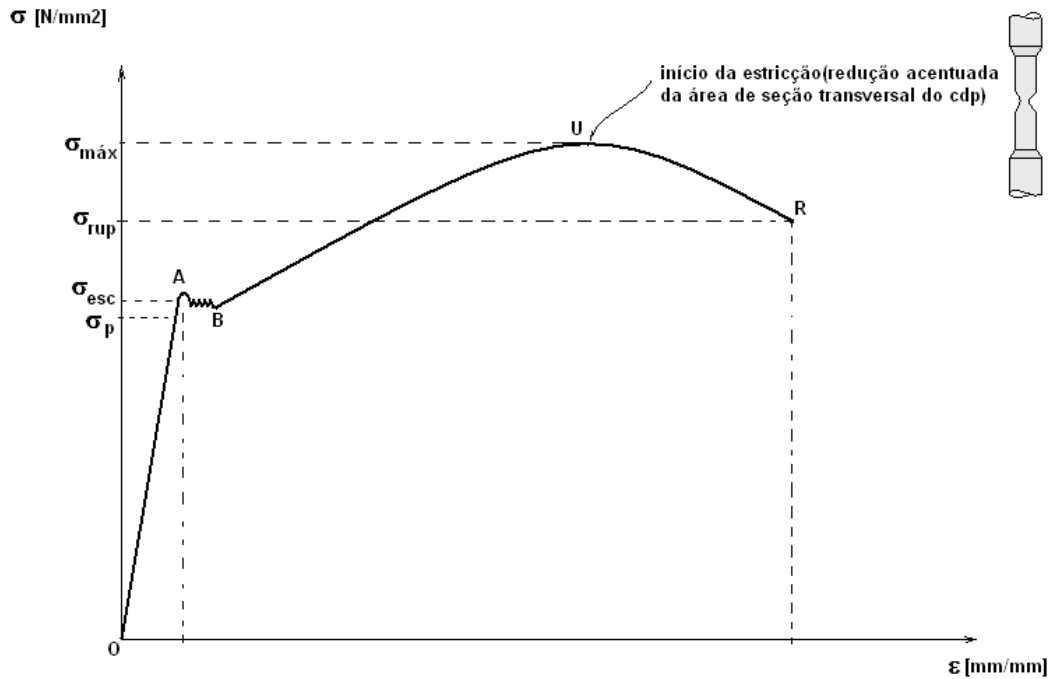
O gráfico σ x ε convencional obtido no ensaio de tração de um material metálico está ilustrado na Figura 1.4. Este gráfico é considerado convencional, por ser admitida a mesma área de seção transversal para o cálculo da tensão de tração, durante a aplicação das cargas crescentes.

OA – região de comportamento elástico	U – ponto de tensão máxima
AR – região de comportamento plástico	R – ponto de ruptura
AB – região de escoamento de discordâncias	σ_U – limite de resistência do material [Mpa] ou [N/mm^2]
BU – região de encruamento uniforme (empilhamento de discordâncias)	σ_R - limite de ruptura do material [Mpa] ou [N/mm^2]
UR – região de encruamento não uniforme (estricção)	σe - limite de escoamento [Mpa] ou [N/mm^2]
A – ponto de escoamento	σp - limite de proporcionalidade [Mpa] ou [N/mm^2]

Figura 1.4 - Curva σ x ε convencional de um metal dúctil submetido ao ensaio de tração.

MÓDULO DE ELASTICIDADE (E): Em regime elástico (região OA) um material que está sujeito a carregamento recupera suas dimensões originais após a retirada da carga. A tensão aplicada ao material no campo elástico é proporcional à deformação sofrida até um dado limite (limite de proporcionalidade). A constante de proporcionalidade entre σ e ε é denominada Módulo de Elasticidade E:

$$\boxed{\sigma = E \cdot \varepsilon} \quad \therefore \quad E = \sigma / \varepsilon \qquad [10^3\ N/mm^2] \text{ ou } [10^3\ MPa] \text{ ou } [\ GPa]$$

Como $\sigma = F / A$ e $\varepsilon = \Delta l / L_o$ $\therefore$ $E = \dfrac{F / A}{\Delta l / L_o}$ $\therefore$ $E = \dfrac{F \cdot L_o}{\Delta l \cdot A}$ ou $\boxed{\Delta l = \dfrac{F \cdot L_o}{A \cdot E}}$

Esta expressão é conhecida por Lei de Hooke, onde Δl = alongamento do campo elástico;
E = Módulo de Elasticidade;
L_o = comprimento inicial do cdp;
A = área da seção transversal do cdp;
F = carga aplicada.

No campo elástico ocorrem mudanças nas distâncias interatômicas e na extensão das ligações interatômicas. O valor de E representa uma medida da resistência à quebra das ligações interatômicas.

MÓDULO DE RESILIÊNCIA (U_R): é a capacidade do material absover energia ao ser elasticamente deformado e liberar esta energia quando descarregado. O módulo U_R é a área abaixo da curva tensão x deformação na região elástica de proporcionalidade (aproximadamente a área do triângulo da Figura 1.5):

$$\boxed{U_R = (\varepsilon_p \times \sigma_p)/2 = (\sigma_p)^2 / 2E}$$

Os materiais resilientes são utilizados na fabricação de molas, por apresentarem tensões limite de escoamento elevadas e módulo de elasticidade pequenos.

TENSÃO LIMITE DE ESCOAMENTO (σ_e): como grande parte das estruturas e componentes mecânicos são projetados para resistir a tensões elásticas, torna-se necessário conhecer o nível de tensão onde se inicia a deformação plástica. No início do escoamento geralmente ocorre maior deformação em relação à tensão aplicada, o que torna este ponto perceptível em alguns materiais dúcteis como o aço de baixo carbono. Nestes materiais a transição do regime elástico para o plástico ocorre de modo abrupto, tal como ilustra a Figura 1.4. Esta é uma característica do fenômeno conhecido por pico de escoamento descontínuo. Por outro lado, para a maioria dos metais a transição elasto-plástica ocorre de maneira gradual, não sendo nítido o ponto de escoamento. Convencionou-se assim traçar uma linha reta paralela à porção elástica da curva σ x ε, a partir de uma pré-derformação de geralmente 0,2%. O ponto de encontro da linha paralela com a curva representa o limite de escoamento convencional de 0,2%, conforme ilustra a Figura 1.5.
A tensão σ_e é útil no cálculo de uma tensão admissível em projetos (σ_{adm}), onde

$$\boxed{\sigma_{adm} = \sigma_e / C.S.} \qquad C.S. = \text{coeficiente de segurança}$$

Na deformação plástica ocorre a ruptura de ligações interatômicas e formação de novas ligações, devido à grande mobilidade de átomos em relação aos seus vizinhos. O mecanismo de deformação plástica em materiais policristalinos é caracterizado por um processo escorregamento, que consiste da movimentação de discordâncias em direções e planos de maior densidade atômica da estrutura cristalina do material. As discordâncias são bloqueadas nos contornos de grão, estes grãos deformam-se e orientam-se segundo uma direção específica; este fenômeno é conhecido por encruamento do metal (região BU da Figura 1.4). O encruamento representa o endurecimento do material por deformação a frio.

TENSÃO LIMITE DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO (σ_U): a tensão máxima suportada pelo material corresponde ao ponto U, denominado Tensão Limite de Resistência à Tração (tensão última).

$$\sigma_U = F / A_o$$

Após o ponto U tem início a estricção, que representa o início da ruptura do material, sendo um fenômeno marcado pela formação de um "pescoço" no corpo de prova.

DUCTILIDADE: medida da capacidade de deformação plástica de um material metálico até a ruptura. Um material frágil experimenta pouca ou nenhuma deformação até o instante da ruptura, enquanto que os materiais dúcteis deformam apreciavelmente antes da ruptura (vide Figura 1.6). A ductilidade de um metal ou liga pode ser medida através de dois métodos: alongamento percentual (Δl %) e redução de área percentual (RA%).

$$\Delta l\ \% = \frac{(L_f - L_o)}{L_o} \times 100 \qquad RA\% = \frac{(A_o - A_f)}{A_o} \times 100$$

L_f = comprimento final da parte útil do corpo de prova após a fratura *;
L_o = comprimento inicial da parte útil do corpo de prova após a fratura;
A_f = área da seção transversal final da parte útil do corpo de prova após a fratura *;
A_o = área da seção transversal inicial da parte útil do corpo de prova;

(* a medição é efetuada após juntarem-se as extremidades de fratura do cdp.)

Um conhecimento sobre ductilidade fornece informações tanto para a área de projeto como para o processo. Uma indicação da capacidade de deformação plástica de uma estrutura antes de se romper pode ser útil ao projetista. Nas operações de conformação é necessário saber o grau de deformação que o material pode suportar sem que ocorra fratura.

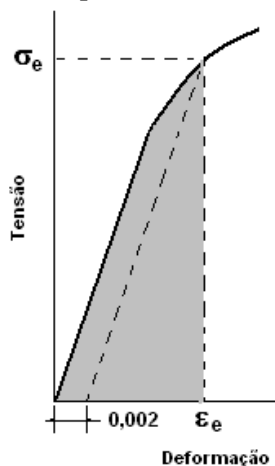



Figura 1.5 Determinação do módulo de resiliência materiais (área sombreada sob a curva no regime elástico) e Limite convencional de 0,2%.

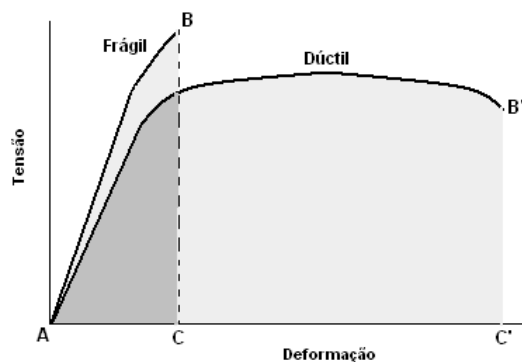



Figura 1.6 Curvas tensão x deformação para frágeis e materiais dúcteis.

TENACIDADE (U_T): a capacidade de um material absorver energia até o momento da fratura é denominado tenacidade. O módulo de tenacidade quantifica a tenacidade de um material, sendo a energia absorvida por unidade de volume, desde o início do ensaio de tração até a fratura do cdp. A área total sobre a curva σ x ε

representa a tenacidade de um material, nestas condições em que ocorrem pequenas taxas de deformação (situação estática).

$U_T = (\sigma_e \times \sigma_u) \cdot \varepsilon_f /2$ (material dúctil)

$U_T = (2/3)\sigma_u \cdot \varepsilon_f$ (material frágil)

A tenacidade pode ser determinada em condições de carrregamento dinâmicas (ensaio de impacto) ou por meio de testes de tenacidade à fratura (corpo de prova contendo uma trinca).

Obs.: Como a deformação e a área de seção transversal do cdp são continuamente alteradas durante o ensaio de tração, o gráfico tensão x deformação convencional não fornece os valores reais para as diferentes propriedades. Se forem consideradas as deformações instantâneas do corpo de prova (mudança na área de seção) a curva tensão x deformação verdadeira apresenta um deslocamento em relação à curva convencional na região plástica.

Nas tabelas 1.1 e 1.2 estão indicadas respectivamente as normas técnicas brasileiras sobre ensaio de tração em metais e os valores de propriedades mecânicas obtidas a partir do ensaio de tração de algumas ligas ferrosas.

Tabela 1.1 Normas técnicas da ABNT relacionadas ao ensaio de tração de materiais ferrosos:

NBR 10130	Chapas de aço - Determinação da redução porcentual da área pelo ensaio de tração na direção da espessura
NBR 6207	Arame de aço - Ensaio de tração
NBR 6673	Produtos planos de aço - Determinação das propriedades mecânicas à tração
NBRISO 6892	Materiais metálicos - Ensaio de tração à temperatura ambiente
NM264-2	Chapas e tiras de aço-carbono, aço ligado e aço inoxidável ferrítico de baixo carbono - Método para determinar o coeficiente de encruamento "n" mediante ensaios de tração axial

Tabela 1.2 Módulos de Elasticidade, Tensão Limite de Escoamento (σ_e), Tensão Limite de Resistência à Tração (σ_U) e Ductilidade (alongamento percentual Δl %) para diferentes ligas ferro-carbono.

Material	E (GPa)	σ_e (MPa)	σ_U (MPa)	(Δl %)
Aço comum (0,2%C)	207	295	395	36,5
Aço comum (0,4%C)	207	355	520	30,2
Aço inoxidável	193	205	515	40
Ferro fundido	80	-	124	-

LISTA DE QUESTÕES E EXERCÍCIOS Nº 1

1) Um corpo de prova cilíndrico de tração possui as seguintes dimensões: Comprimento inicial da parte útil = 70 mm e Diâmetro da parte útil = 14 mm. Se a carga de escoamento e a carga máxima atingida no ensaio são respectivamente 54648 N e 80048 N, calcule as tensões limite de escoamento e de resistência do material. Qual dos materiais da tabela 9.1 é este material ? Calcule o comprimento final da parte útil do corpo de prova fraturado.

2) A parte útil de um corpo de prova de tração de seção transversal circular possui diâmetro d = 12 mm, e o seu comprimento inicial é de 50,8 mm. Ao ser ensaiado por uma tensão de 200 MPa, apresenta um alongamento na região elástica de 0,0526 mm. Qual dos materiais listados na tabela 1.2 é este material ? Calcule a ductilidade por meio da redução de área percentual deste corpo de prova. Calcule o valor dos módulos de resiliência e de tenacidade do material.

3) Um corpo de prova de aço comum (0,2%C) com as mesmas dimensões da questão 1 é ensaiado por tração. Qual o alongamento sofrido pelo corpo de prova se a carga aplicada no ensaio atingir 31,7 kN? Qual o comprimento final da parte útil do corpo de prova ?

4) Uma barra de aço com 100 mm de comprimento e que possui uma seção reta quadrada com 20 mm de aresta é puxada em tração com uma carga de 89000 N, e experimenta um alongamento de 0,1 mm. Admitindo que a deformação é inteiramente elástica, calcule o módulo de elasticidade do aço.

5) Um corpo de prova em ferro fundido dúctil, que possui uma seção reta retangular com dimensões de 4,8 mm x 15,9 mm, é deformado em tração. Usando os dados de carga-alongamento tabulados abaixo, responda às questões de **a**) até **f**).

Carga (N)	Comprimento (mm)
0	75,000
4.740	75,025
9.140	75,050
12.920	75,075
16.540	75,113
18.300	75,150
20.170	75,225
22.900	75,375
25.070	75,525
26.800	75,750
28.640	76,500
30.240	78,000
31.100	79,500
31.280	81,000
30.820	82,500
29.180	84,000
27.190	85,500
24.140	87,000
18.970	88,725
Fratura	

(a) Plote os dados na forma de tensão x deformação;
(b) Calcule o módulo de elasticidade;
(c) Determione a Tensão Limite de Escoamento para uma pré-deformação de 0,002;
(d) Determine a Tensão Limite de Resistência à tração desta liga;
(e) Calcule o módulo de resiliência;
(f) Qual a ductilidade, em alongamento percentual?

6) Cite as normas técnicas brasileiras que descrevem os procedimentos de ensaio de tração em materiais metálicos.

7) Definir tenacidade de um material. Como se determina a tenacidade?

8) Que tensão de tração de material dúctil é utilizada para o cálculo da tensão de projeto ? Justifique sua resposta.

2) Ensaio de dureza

A dureza de um material é a medida da sua resistência à deformação plástica produzida por uma impressão ou risco. Na escala de dureza Mohs a dureza representa a capacidade de um material riscar outro mais macio. Por exemplo, o gesso (2) risca o talco (1), mas não risca o quartzo (7). Portanto, esta é uma escala apenas qualitativa, onde o diamante é o material mais duro (dureza Mohs diamante = 10, vide Figura 10.1). Utilizam-se na indústria os métodos quantitativos para o controle da dureza dos materiais, onde um aparelho (durômetro) fornece um número índice do valor de dureza relacionado ao tamanho de uma impressão produzida na superfície do material. Os métodos consistem em aplicar uma carga num pequeno penetrador esférico ou pontiagudo posicionado na superfície plana do material; o aparelho mede e indica a profundidade ou as dimensões da impressão produzida. As diferentes escalas dependem do tipo de penetrador (esférico, cônico, piramidal), da pré-carga e da carga principal aplicada. Um material macio tem uma impressão maior e mais profunda e é menor o número índice de dureza. O ensaio de dureza é muito utilizado na indústria metal-mecânica por ser simples e barato, não inutilizar a peça ensaiada (é um ensaio não-destrutivo), e fornecer uma estimativa da resistência à tração do material.

DUREZA ROCKWELL

O método Rockwell permite a determinação da dureza de praticamente todos os metais e ligas, desde que se utilize a escala rockwell apropriada aos diferentes materiais. Cada escala rockwell admite um tipo de penetrador (ponta esférica ou cônica de diamante) e uma carga principal (kg), conforme as listagens das tabelas 2.1 e 2.2.

ESCALAS DE DUREZA ROCKWELL

Símbolo da escala	Penetrador	Carga Principal
A	Diamante	60
B	Esfera 1/16	100
C	Diamante	150
D	Diamante	100
E	Esfera 1/8	100
F	Esfera 1/16	60
G	Esfera 1/16	150
H	Esfera 1/8	60
K	Esfera 1/8	150

Tabela 2.1 Escalas de Dureza Rockwell;

ESCALAS DE DUREZA ROCKWELL SUPERFICIAL

Símbolo da escala	Penetrador	Carga Principal
15N	Diamante	15
30N	Diamante	30
45N	Diamante	45
15T	Esfera 1/16	15
30T	Esfera 1/16	30
45T	Esfera 1/16	45
15W	Esfera 1/8	15
30W	Esfera 1/8	30
45W	Esfera 1/8	45

Tabela 2.2 Escalas de Dureza Rockwell Superficial;

Procedimento de ensaio: inicialmente é aplicada uma pré-carga (10 kg ou 3 kg) sobre a superfície do corpo de prova. Em seguida, aplica-se a carga principal (carga maior). O número índice de dureza rockwell representa a diferença na profundidade de penetração produzida pela pré-carga e a carga principal. Esta diferença é indicada no mostrador analógico ou digital do durômetro. Um durômetro Rockwell analógico está ilustrado na Figura 2.2.

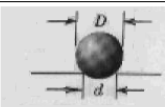
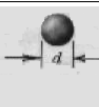
Dureza Rockwell: pré-carga = 10 kg

carga principal = 60, 100 ou 150 kg

Dureza Rockwell Superficial: pré-carga = 03 kg

carga principal = 15, 30 ou 45 kg

A especificação da dureza rockwell é feita pelo número índice medido junto ao símbolo da escala utilizada. Por exemplo, um aço com dureza de 50 na escala C é especificado como tendo dureza 50HRC; um tratamento superficial com dureza de 40 na escala 45N é indicado por 40HR45N.

A dureza em cada escala pode variar até 130, mas valores acima de 100 ou abaixo de 20 se tornam imprecisos; em tais casos o correto é utilizar a próxima escala mais dura ou mais macia. Outros fatores que provocam imprecisões são a espessura (e) fina do corpo de prova (cdp) e a distância entre impressões ou entre impressão e aresta do cdp (*D*). Neste sentido, recomenda-se como mínimo as seguintes relações:

$e > 10 \times p$ onde: p = profundidade de impressão;
e = espessura do corpo de prova;
$D = 3 \times d$ *D* = distância entre impressões ou entre impressão e aresta do cdp;
d = diâmetro de impressão.

OBS.: não recomenda-se realizar um ensaio em cdp's posicionados uns sobre os outros; a superfície do cdp deve ser lisa e plana.

DUREZA BRINELL

O ensaio de dureza Brinell consiste da aplicação de uma carga padrão a um penetrador esférico de aço endurecido (ou de carbeto de tungstênio) com diâmetro de 10 mm. Dependendo do tipo de material a ser testado, a carga padrão utilizada pode variar de 500 até 3000 kg (em intervalos de 500 kg); esta carga é mantida por um período de 10-30s durante o ensaio. O número de dureza Brinell depende tanto da magnitude da carga quanto do diâmetro de impressão, sendo obtido por qualquer uma das duas formas seguintes: 1) cálculo de HB através da fórmula da tabela 2.3; 2) gráfico que relaciona o índice HB com o diâmetro de impressão. Esse diâmetro de impressão (d) é medido com auxílio de um microscópio de baixa potência acoplado ao durômetro, utilizando uma ocular com escala graduada.

Tabela 2.3 Particularidades de cada técnica de ensaio de dureza – Brinell e Rockwell(fonte: Callister Jr. W.D. Ciência e Engenharia dos Materiais : uma introdução, LTC, 2002)

ENSAIO	PENETRADOR	FORMA DE IMPRESSÃO VISTA LATERAL	FORMA DE IMPRESSÃO VISTA SUPERIOR	Cálculo do índice de dureza
BRINELL	Esfera com 10 mm em aço ou carbeto de tungstênio	D, d	d	$HB = \frac{2P}{\pi D\left(D - \sqrt{D^2 - d^2}\right)}$
ROCKWELL ROCKWELL SUPERFICIAL	Cone de diamante	120°		60 kg, 100 kg, 150 kg — Rockwell
	Esferas de aço com diâmetro de 1/16", 1/8", 1/4", 1/2"			15 kg, 30 kg, 45 kg — Rockwell Superficial

As recomendações para espessura máxima do corpo de prova e distância mínima entre impressões e entre impressão e aresta do cdp são as mesmas para o ensaio Rockwell.

Na Figura 2.1 é feita uma comparação entre as diferentes escalas de dureza. Os dados mais confiáveis para conversão de dureza de uma escala para outra são os dados para os aços.

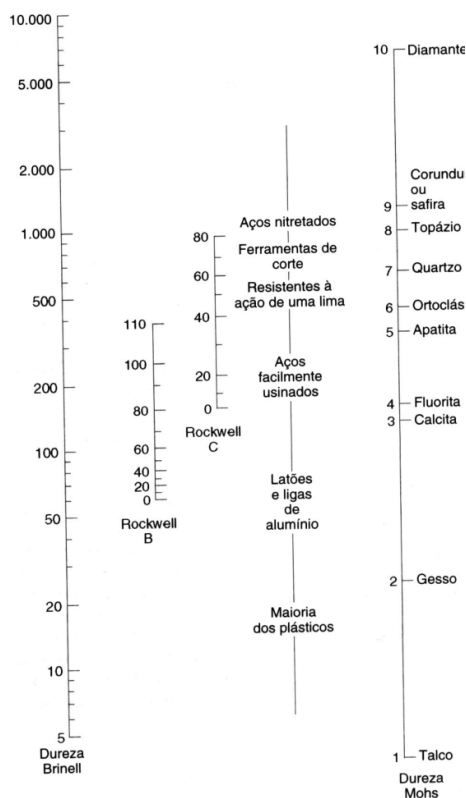



Figura 2.1 Comparação do valor de dureza de diferentes resistência materiais nas escalas Brinell, Rockwell e Mohs.

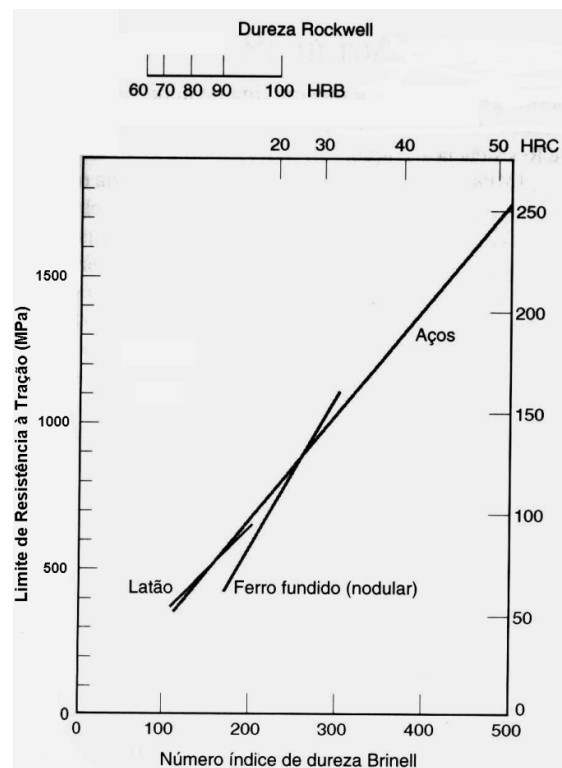



Figura 2.2 Correlação entre dureza e limite de à tração para diferentes materiais metálicos.

A resistência de um metal à deformação plástica pode ser estimada tanto pelo limite de resistência à tração como pela dureza. Assim, existe uma relação de proporção entre os valores de dureza e do limite de resistência à tração para materiais metálicos. Na Figura 2.2 estão indicadas as relações existentes entre durezas HB e HRB e tensões limite de resistência para o ferro fundido, o aço e o latão. Para os aços a relação de proporção é dada pela expressão LRT (MPa) = 3,45 x HB. Na tabela em anexo é apresentada uma relação de normas técnicas brasileiras sobre ensaios de dureza Brinell e Rockwell.

LISTA DE QUESTÕES E EXERCÍCIOS Nº 02

1) Deve ser construído um dispositivo para ensaios de tração que tenha capacidade para suportar uma carga máxima de 220.000 N. O projeto exige dois postes de sustentação cilíndricos, cada um dos quais deve sustentar metade da carga máxima. Além disso, devem ser usadas barras redondas de aço carbono 1045, lixadas e polidas; o limite de escoamento e o limite de resistência à tração mínimos desta liga são de 310 MPa e 565 Mpa. Especifique o diâmetro apropriado para esses postes de sustentação. *Obs.: utilizar um C.S. relativamente conservador de 5, já que é necessário assegurar que o dispositivo tenha operação segura, sem que ocorra deflexão plástica das barras redondas.*

2) Os limites de resistência à tração que foram medidos para quatro corpos de prova da mesma liga de aço foram 520, 512, 515 e 522 MPa. (a) Calcule o limite de resistência à tração médio; (b) Determine o desvio padrão.

3) Um penetrador para ensaios de dureza Brinell com 10 mm de diâmetro produziu uma impressão com diâmetro de 1,62 mm em uma liga de aço, quando foi usada uma carga de 500 kg. Calcule o valor da dureza HB deste material.

4) Qual deverá ser o diâmetro de uma impressão para produzir uma dureza de 450 HB, quando uma carga de 500 kg é usada?

5) Abaixo estão tabulados valores de dureza Rockwell B que foram medidos em um único corpo de prova de aço. Calcule os valores da dureza média e do desvio padrão.

83,3 80,7 86,4 88,3 84,7 85,2 82,8 87,8 86,9 86,2 83,5 84,4 87,2 85,5 86,3

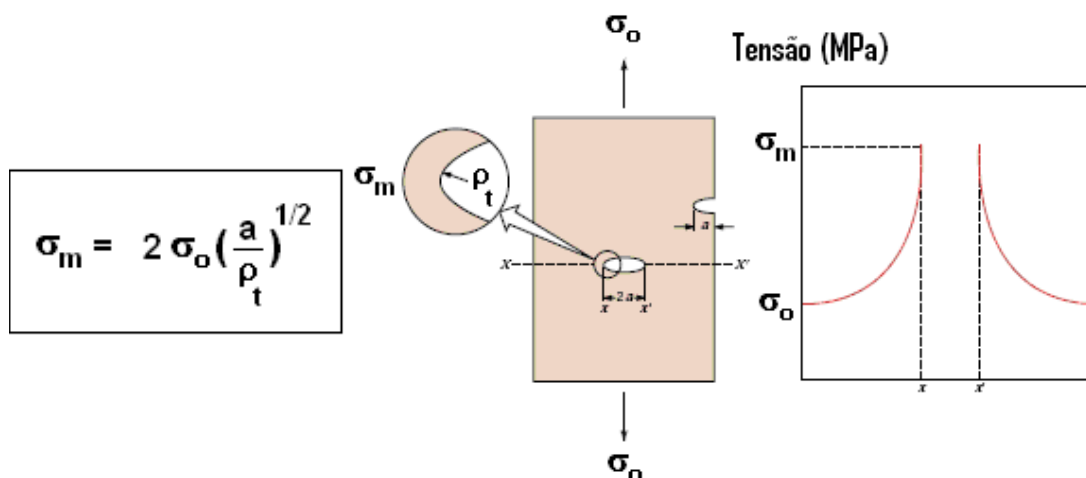
6) Uma grande torre deve ser sustentada por vários fios de aço. Estima-se que a carga sobre cada fio será de 11.100 N. Determine o diâmetro mínimo do fio que é exigido, supondo um fator de segurança de 2 e um limite de escoamento de 1030 MPa.

7) Usando os dados representados na Fig. 2.2, encontre a equação que relaciona o limite de resistência à tração e a dureza Brinell para o ferro fundido nodular, semelhante à equação LRT (MPa) = 3,45 x HB para os aços.

Normas técnicas da ABNT relacionadas ao ensaio de dureza de materiais metálicos.

NORMA ABNT	TÍTULO	OBJETIVO
NBRNM187-1	Materiais metálicos - Dureza Brinell - Parte 1: Medição da dureza Brinell	Especifica o método de medição da dureza Brinell para materiais metálicos. Existem normas especificas para materiais ou produtos particulares.
NBR8582	Peças em ferro fundido nodular ou ferro fundido com grafita esferoidal classificadas conforme a dureza Brinell	Apresenta os índices de dureza Brinell dos ferros fundidos nodulares
NBR8583	Peças em ferro fundido cinzento classificadas conforme a dureza Brinell	Apresenta os índices de dureza Brinell dos ferros fundidos cinzentos
NBRNM171	Tubos de aço - Ensaio de dureza	Descreve o procedimento de ensaio de dureza em tubos de aço
NBRNM146-1	Materiais metálicos - Dureza Rockwell - Parte 1: Medição da dureza Rockwell (escalas A, B, C, D, E, F, G, H e K) e Rockwell superficial (escalas 15 N, 30 N, 45 N, 15 T, 30 T e 45 T)	Especifica o método para determinação da dureza Rockwell e Rockwell superficial para materiais metálicos (para campos de aplicação e escala). Para materiais específicos e/ou produtos existem norma particulares no sistema internacional.
NBR7407	Folhas-de-flandres - Determinação da dureza Rockwell	Descreve o procedimento de ensaio de dureza em folhas-de-flandres

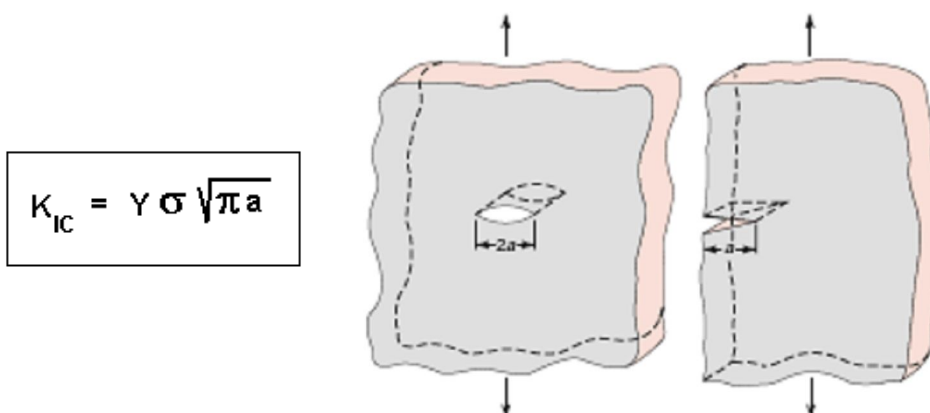
3) Tenacidade à fratura e Ensaio de flexão

Em geral as cerâmicas, vidros, aços ferramenta e o metal duro fraturam à tração na temperatura ambiente antes que ocorra qualquer deformação plástica. Assim, devido ao comportamento frágil, certas propriedades mecânicas destes materiais são determinadas a partir da mecânica da fratura. A mecânica da fratura estuda as relações entre propriedades dos materiais, o nível de tensão, a presença de defeitos geradores de trincas e os mecanismos de propagação de trincas. A seguinte expressão relaciona as características geométricas da trinca com a tensão mecânica atuante:

σ_m = tensão máxima na extremidade da trinca (MPa)

σ_o = tensão de tração aplicada (MPa)

ρ_t = raio de curvatura da extremidade da trinca

a = comprimento da trinca superficial

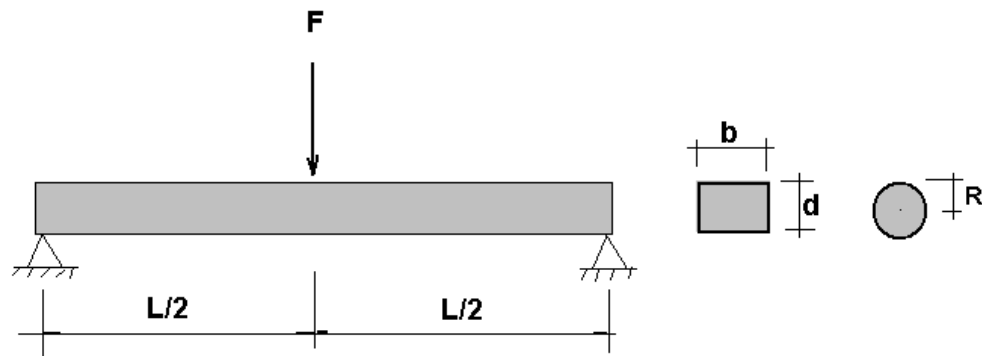
Tenacidade à fratura:- nos defeitos microscópicos do material se concentram tensões e, portanto, a tensão de tração nestes pontos é amplificada. A tenacidade à fratura (K_{IC}) é a medida da capacidade da cerâmica resistir à fratura, quando uma trinca está presente; é dada por:

K_{IC} = coeficiente de tenacidade à fratura [MPa $\sqrt{m}$]

Y = constante da amostra e geometria da trinca

σ = tensão aplicada [MPa]

a = comprimento da trinca superficial ou da ½ da trinca interna [m]

Resistência à flexão:- a resistência mecânica de cerâmicas, aços ferramenta e metal duro não podem ser avaliada a partir de seu comportamento tensão-deformação no ensaio de tração, devido aos seguintes motivos:

1º) dificuldade na preparação e teste de corpos de prova com a geometria exigida;
2º) fixação do corpo de prova (material frágil);
3º) exigência de maior precisão no alinhamento do corpo de prova (deformam à fratura com $\varepsilon \approx 0{,}1\%$)

$$\sigma_f = \frac{3\ F_f\ L}{2\ b\ d^2}$$

Seção retangular

$$\sigma_f = \frac{F_f\ L}{\pi\ R^3}$$

Seção circular

$\boldsymbol{\sigma_f}$ = resistência à flexão ou módulo de ruptura (MPa)
$\mathbf{F_f}$ = carga de fratura

Dureza:- As escalas de dureza utilizadas para materiais cerâmicos e metais endurecidos são a Knoop e a Vickers. Uma das características importantes das ferramentas de cerâmica para usinagem é a sua dureza à quente. Fig. 7

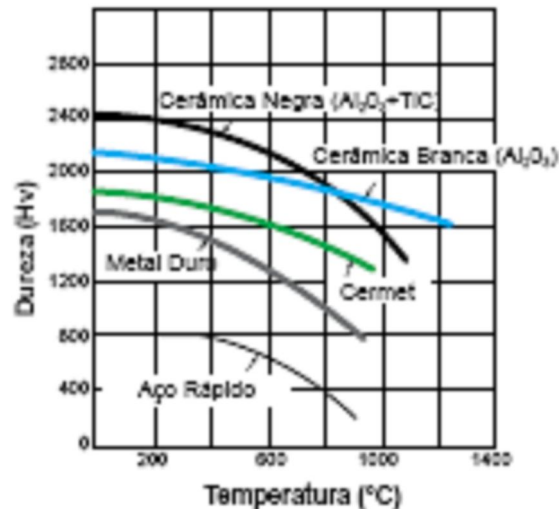



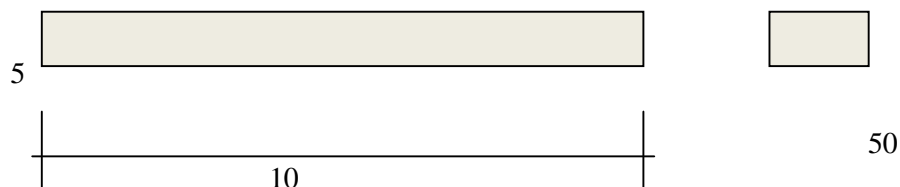
Figura 3.1. Variação da dureza à quente de ferramentas de usinagem

LISTA DE QUESTÕES E EXERCÍCIOS Nº 03

1) Calcule o raio crítico da extremidade de uma trinca para uma amostra de Al_2O_3 que experimenta fratura por tração a uma tensão aplicada de 275 MPa. Suponha um comprimento crítico da trinca de superfície de 2 X 10^{-3} mm, além de uma resistência à fratura teórica de E/10, onde E representa o Módulo de Elasticidade.

2) Calcule o tamanho crítico da trinca superficial de uma placa cerâmica (pequena espessura) que está submetida a uma tensão de 300 MPa.

Dados: K_{IC}= 5 MPa √m, Y = 1,0

3) A resistência à flexão de uma cerâmica de alumina (Al_2O_3) é σ_f = 500 MPa. Faça uma estimativa da carga de ruptura por flexão de um corpo de prova desse material que apresenta as seguintes dimensões:

distância entre os apoios = 40 mm

4) Uma amostra circular de MgO é carregada usando-se o modo de flexão em três pontos. Calcule o mínimo raio possível para a amostra sem que haja a ocorrência de uma fratura, sabendo-se que a carga aplicada é de 425 N, a resistência à flexão é de 105 MPa e a separação entre os pontos de carregamento é de 50 mm.

5) Ensaio de impacto

Normas de referência: NBR 6157, NBR 8425, ASTM A-370, ASTM E-23

Objetivos

a) Avaliação a resistência ao impacto de um material em diferentes temperaturas;
b) Conhecer o tipo de fratura ocorrida no ensaio, avaliando e classificando-a como dúctil ou frágil.

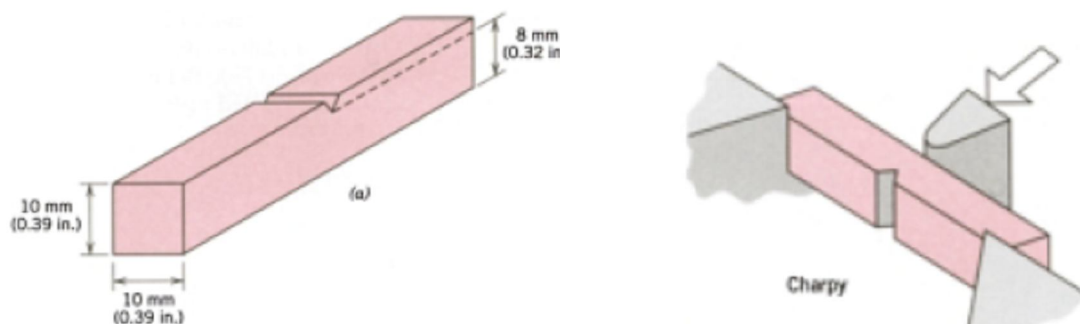



Figura 1. Corpo de prova para ensaio de impacto Charpy para determinação da tenacidade ao impacto de materiais metálicos (fonte: CALLISTER JR, W. Ciencia e Engenharia dos Materiais: uma introdução, Rio de Janeiro: LTC).

Fundamentos

Consiste o ensaio na determinação da resistência ao impacto de determinado material, a partir da energia absorvida pelo corpo de prova (Figura 1) ao se chocar com um pêndulo que possui energia cinética pré-determinada. Este ensaio é geralmente realizado em materiais que trabalharão próximos a zona de temperatura de transição (Figura 2), que se situa, via de regra, abaixo da temperatura ambiente (20º C) como teste de aceitação para construção de equipamento de alto risco. Neste ensaio simulam-se as condições de serviço mais severas em relação ao potencial de ocorrência de fratura, tais como: 1) deformação a uma temperatura relativamente baixa; 2) taxa de deformação elevada (traduzida como alta velocidade de aplicação da carga: impacto) e 3) presença no material de um estado de tensão triaxial (simula-se a presença de uma trinca ao introduzir-se um entalhe no corpo de prova de ensaio de impacto).
Como a energia absorvida pelo material depende de uma série de variáveis, tais como sua forma e dimensão, bem como da temperatura e velocidade de aplicação da carga (energia), entre outras, é necessário que:

a) padronização do tipo de ensaio
b) rigoroso controle dimensional
c) rigoroso controle das condições ambientais e da temperatura do cdp no momento da aplicação da carga

Os materiais e equipamentos necessários para realização deste ensaio são os seguintes: corpos de prova (cdp) entalhados nas dimensões especificadas em norma técnica (Figuras 1, 4 e 5), forno de resfriamento/aquecimento dos cdp, pêndulo de ensaio de impacto, software de aquisição de dados e determinação da curva de transição dúctil-frágil (opcional).

Estes controles são efetuados com o intuito de se poder ter meios de comparação entre o comportamento de diversos materiais em condições semelhantes.

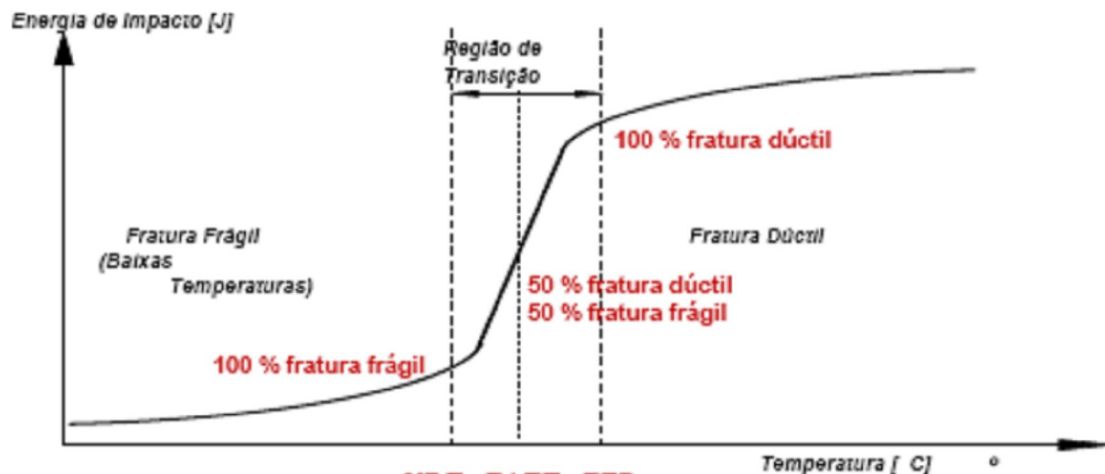
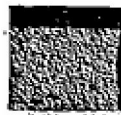



Figura 2 – Região da temperatura de transição

Pela figura 2, podemos observar que:

a) Patamar superior: trecho acima da faixa de dispersão, caracterizando por valores elevados e pouco dispersos da energia absorvida.
b) Zona de transição: região de grande dispersão dos valores da energia absorvida. Nesta região a resistência ao impacto pode assumir valores aleatórios.
c) Patamar inferior: trecho do diagrama que se situa abaixo da zona de transição e se caracteriza por apresentar valores baixos, porém pouco dispersos de energia absorvida.

Após o ensaio podemos observar também qual o comportamento da fratura ocorrida no corpo de prova. Conforme a Figura 3 pode ocorrer três tipos de fratura: dúctil, frágil e mista, que são determinadas de acordo com o valor da energia absorvida ou com o aspecto da na região da fratura.

Aspecto brilhoso
Granular ou de clivagem

Aspecto fosco
Opaco, fibroso ou de cisalhamento

Aspecto brilhoso internamente e fosco externamente

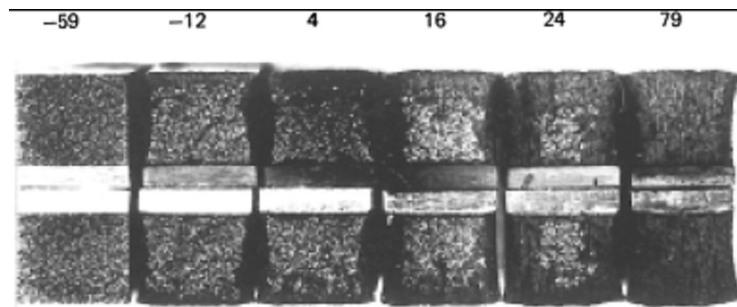



Figura 3. Aspectos da fratura de 6 (seis) cdp's ensaiados ao impacto Charpy em diferentes temperaturas (fonte: CALLISTER JR, W. Ciencia e Engenharia dos Materiais: uma introdução, Rio de Janeiro: LTC).

Ensaio

O ensaio de impacto são utilizados corpos de prova com entalhe em "V" (figuras 1 e 4) ou em "U", denominados ensaio Charpy e ensaio IZOD, respectivamente.

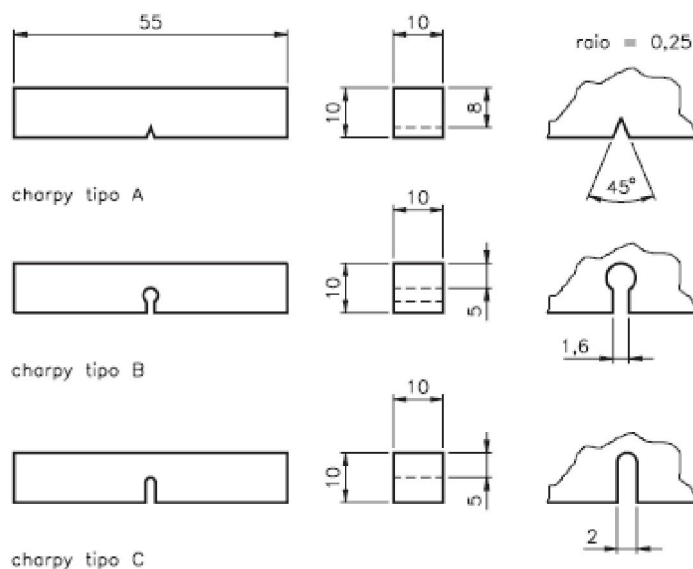



Figura 4 – Corpos de prova para o ensaio Charpy.

O CP é bi-apoiado na máquina de ensaio (ensaio charpy) ou engastado (ensaio Izod) como mostrado na Figura 5. A carga é aplicada dinamicamente através de um pêndulo com um martelo adaptado em sua extremidade, sendo que a parte do martelo que irá se chocar com CP chama-se "pena".

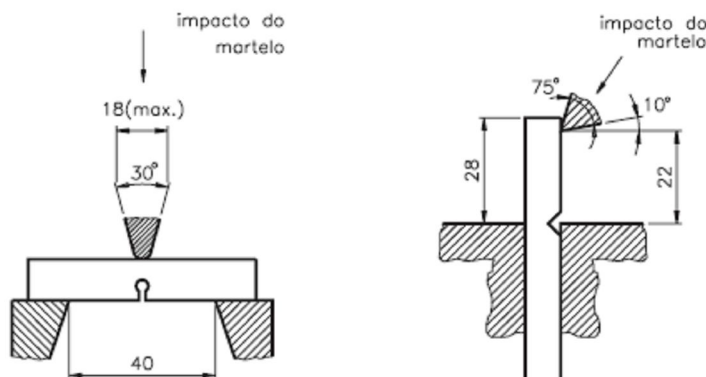



Figura 5 – Posicionamento do cdp para realização do ensaio de impacto.

Na maioria dos equipamentos construídos para a realização do ensaio, já existe uma escala de valor a de fratura, normalmente graduada em kg.m, N.m ou J, devendo-se utilizar expressão da resistência ao impacto para o cálculo.

$$RI = \Delta U/So$$

A Figura 6 ilustra uma máquina de ensaio de impacto Charpy com a indicação de seus principais componentes.

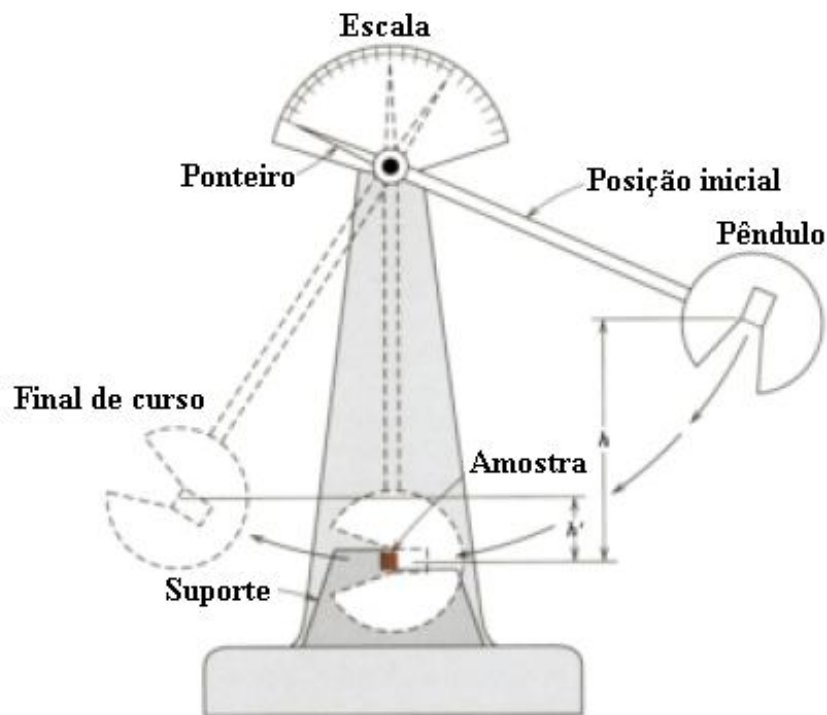



Figura 6 – Pêndulo de ensaio de impacto Charpy para a determinação da curva de transição dúctil-frágil de materiais metálicos. (fonte: CALLISTER JR, W. Ciencia e Engenharia dos Materiais: uma introdução, Rio de Janeiro: LTC)

Procedimento para execução do ensaio:

a) Verificar a dissipação da energia pelo atrito. Esta operação deve ser efetuada através da liberação do pêndulo em vazio, ou seja, sem a presença do corpo de prova;

b) Medir os corpos de prova, com os aparelhos de medição indicados, registrando e identificando cada um deles;

c) Medir a dureza dos corpos de prova com um dos métodos já conhecidos e registrar seus valores. Não devendo ser realizada próximo ao entalhe do corpo de prova;

d) Apoiar o martelo pendular no seu encosto superior travando-o nesta posição;

e) Apoiar os corpos de prova, cada uma ao seu tempo, na parte inferior do dispositivo de fixação. Observar que o Cp deverá estar centralizado no seu apoio;

f) Levar o ponteiro da escala da máquina ao zero;

g) Após assegurar-se que todos os componentes do grupo de trabalho encontram-se em posição de segurança, liberar o pendulo da sua trava;

h) Após o choque, imobilizar o pêndulo e apanhar o CP rompido;

i) Determinar a resistência ao impacto do CP e o tipo de fratura que nele ocorreu (% fratura dúctil).

j) Repetir o procedimento para os cdp's restantes para cada temperatura e traçar as ***curvas de transição dúctil-frágil A*** e ***B*** do material, tal como ilustra a Figura 7.

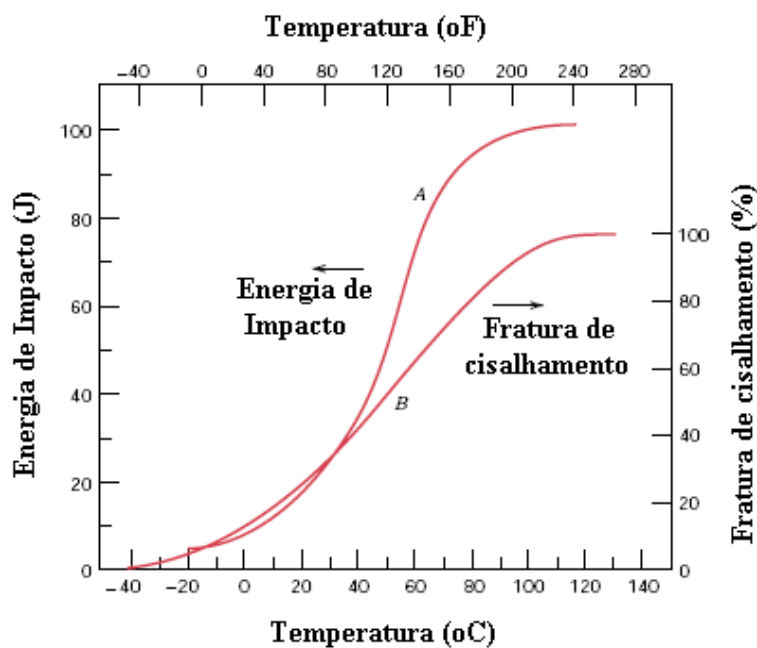



Figura 7. Curvas de transição dúctil-frágil obtidas a partir do ensaio de impacto Charpy de um aço A238: a ***curva A*** ilustra a dependência entre a energia absorvida e a temperatura do cdp, a ***curva B*** ilustra a dependência entre a temperatura do cdp e o percentual de área de fratura de cisalhamento (lado direito do diagrama)

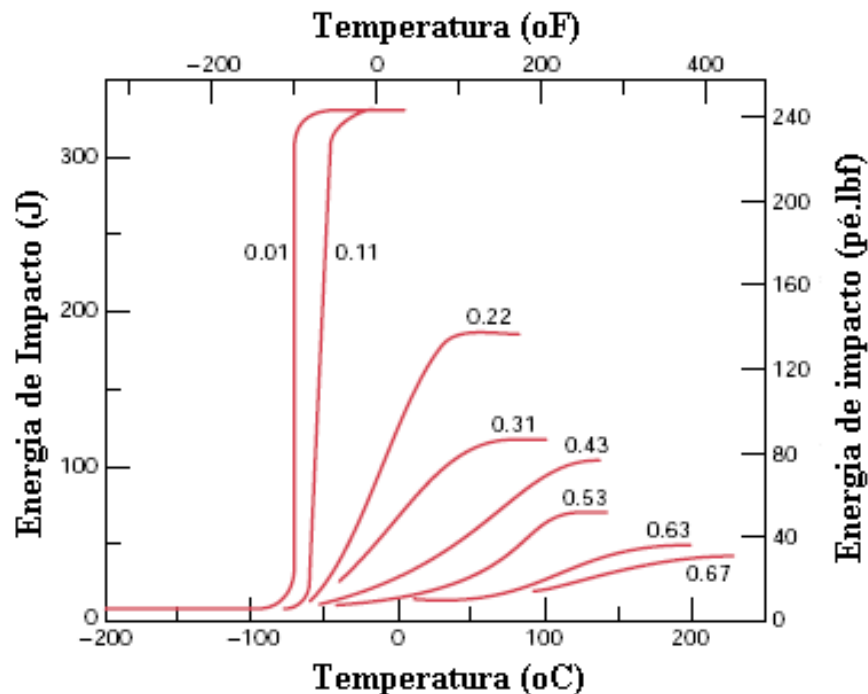



Figura 8. Influência do teor de carbono no comportamento dúctil-frágil determinado no ensaio de impacto Charpy para aço.

Nas figuras 7 e 8 estão representadas as curvas de transição dúctil-frágil de aços, obtidas a partir do ensaio de impacto de corpos de prova com diferentes temperaturas, desde à faixa subzero (os cdp's são imersos em nitrogênio líquido ou gelo seco para atingir estas temperaturas negativas) até as temperaturas de aquecimento na faixa dos 150-200 ^oC. Quanto maior o % C do aço **menor** a tenacidade ao impacto deste material na faixa de temperatura ambiente de –40 ^oC a +40 ^oC (p. ex. na temperatura de 25 ^oC: o aço com 0,63 %C fratura com uma energia absorvida de aprox. 25 J (frágil), o aço com 0,53 %C fratura com 30 J, aço com 0,43 %C fratura com 40 J (transição), aço com 0,31 %C fratura com 85 J (transição) e o aço com 0,22 %C fratura com 175 J (dúctil).

LISTA DE QUESTÕES E EXERCÍCIOS Nº 04

Os dados que foram coletados de um ensaio de impacto Charpy de ferro fundido dúctil encontram-se tabulados a seguir:

Temperatura (^oC)	Energia de Impacto (J)
-25	124
-50	123
-75	115
-85	100
-100	73
-110	52
-125	26
-150	9
-175	6

1) Plote os dados na forma de energia de impacto em função da temperatura.
2) Determine uma temperatura de transição dúctil-frágil como sendo a temperatura que corresponde à média entre as energias de impacto máxima e mínima.
3) Determine uma temperatura de transição dúctil-frágil como sendo aquela em que a energia de impacto é de 80 J.